

Enhancement of image quality by utilization of a priori information

Patent Number: ☐ US492049

Publication date: 1990-04-24

Inventor(s): EBERHARD JEFFREY W (US); HEDENGREN KRISTINA H (US)

Applicant(s): GEN ELECTRIC (US)

Requested Patent: ☐ DE3915370

Application Number: US19880194235 19880516

Priority Number(s): US19880194235 19880516

IPC Classification: G01N23/04; G06F15/42

EC Classification: G01N23/04D, G06T11/00T

Equivalents:

☐ FR2631475, ☐ GB22220830, ☐ IT1235877, ☐ JP2050779

Abstract

The quality of incomplete data Non-Destructive Evaluation and Computed Tomography images is improved by incorporating a priori information into the image reconstruction and image processing to supplement the available data. The a priori information is provided by electronic models of the part derived from a solid modeler, physics of the inspection process, and outputs of touch and other sensors. Methods of improving limited-angle X-ray CT images are given. Calculated projection data in the missing angular range is provided by calculating x-ray path lengths through a solid model of the part, and x-ray attenuation from known physical parameters of the part and source. The measured and calculated projection data are combined to reconstruct the CT image. In an iterative reconstruction approach, precise boundary information from a model and calculated attenuation are information to improve the limited angle image.

Data supplied from the esp@cenet database - 12

[illegible]

^a The number of subjects who were included in each group was 10.

1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 26

[illegible]

Die Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung und der Computertomographie erhaltenen, auf unvollständigen Daten beruhenden Bildern wird durch Einbeziehen von Apriori-Information in die Bildrekonstruktion und die Bildverarbeitung verbessert, um die verfügbaren Daten zu ergänzen. Die Apriori-Information wird von elektronischen Modellen des Teiles geliefert, die von einem festen Modell-ierer abgeleitet sind, der Physik des Untersuchungsverfahrens und der Anzeigen von Berührungs- und anderen Sensoren. Verfahren zum Verbessern von Röntgen-Tomographie-Bildern mit begrenztem Winkel sind angegeben. Errechnete Projektionsdaten im fehlenden Winkelbereich werden gefertigt durch Berechnen der Röntgen-Pfadlängen durch ein festes Modell des Teiles, die Röntgenschwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und der Quellen. Die gemessenen und errechneten Projektionsdaten werden kombiniert, um das Computertomographie-Bild zu rekonstruieren. Ein Herangehen über die iterative Rekonstruktion, genaue Information über die Grenzen von einem Modell und berechnete Schwächung sind Information, um das Bild aus begrenztem Winkel zu verbessern.

(54) Verbesserung der Bildqualität durch Benutzung von a priori-Information

<p>(30) Unionspriorität: (22) (33) (31) 16.05.88 US 194235</p> <p>(71) Anmelder: General Electric Co., Schenectady, N.Y., US</p> <p>(74) Vertreter: Schüler, H., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 6000 Frankfurt</p>	<p>(72) Erfinder: Eberhard, Jeffrey Wayne; Hedengren, Kristina Helena Valborg, Schenectady, N.Y., US</p>
---	--

DEUTSCHES
PATENTAMT



DEUTSCHLAND

(19) BUNDESREPUBLIK

(12) **Offenlegungsschrift**
(11) **DE 3915370 A1**

(21) Aktenzeichen: P 39 15 370.3
(22) Anmeldetag: 11. 5. 89
(43) Offenlegungstag: 30. 11. 89

(51) Int. Cl. 4: G 01 N 23/04
G 06 F 15/62
G 03 B 42/00

DE 3915370 A1

ebenso wie die physikalischen Eigenschaften des Teiles

und die Abbildungsmittelquelle; Dritten können andere Sensoren anzeigen, die während der Untersuchung des Teiles erhalten worden sind, wie die Information über die Grenze von einem Berührungssensor, zusätzliche Apriori-Information liefern. Ein Vorteil des elektronischen Modells ist es, daß solche festen Modelle Information sowohl über das Innere als auch die äußere Grenze liefern.

Die Erfindung ist auf viele NDE-Abbildungstechniken und Modalitäten anwendbar, einschließlich auf Röntgen-Abbildungen, digitale Radiographie, Ultraschalluntersuchung, Wirbelstromuntersuchung sowie IR- und visuelle Inspektion, auf diese genannten Gebiete ist die Erfindung jedoch nicht beschränkt.

Ein Aspekt der Erfindung ist ein Verfahren des NDE-Abbildens unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend die Stufen:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen verfügbaren Bereich und Erzeugen gemessener Parameterdaten der Abbildung;

Schaffen eines dreidimensionalen Modells des Teiles und Errechnen der relevanten Geometrie des Teiles und Teiles und möglichst der Abbildungsmittelquelle;

Kombinieren der Geometrie und der physikalischen Eigenschaften des Teiles und Errechnen der Parameterdaten der Abbildung über einen nicht verfügbaren Abtastbereich, der wegen physikalischer oder betriebsmäßiger Beschränkungen nicht abgetastet werden kann und

Bilden eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und errechneten Bildparameterdaten.

Die bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung sind drei Arten des Herangehens zur Verbesserung der Qualität von Röntgen-Computertomographie-Bildern mit begrenztem Winkel unter Verwendung genauerer Apriori-Information. Der Lösungsweg über die Projektionsdaten ist ein Verfahren, umfassend das Abtasten eines Teiles mit Röntgenstrahlen über einen begrenzten Winkelbereich und das Erzeugen gemessener Projektionsdaten aus verfügbaren Betrachtungswinkeln.

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles, das von einem dreidimensionalen festen Modellierer abgeleitet ist und Errechnen der Röntgenschwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und der Röntgenquelle;

Errechnen von Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und der Schwächung und

Rekonstruieren eines Bildes des Teiles von Mo-

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Gute Bildqualität und wesentliche Information bei unvollständigen Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Gute Bildqualität und wesentliche Information bei unvollständigen Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern der Qualität von bei der zerstörungsfreien Untersuchung erhaltenen Bildern, und sie betrifft mehr im besonderen das Einbeziehen von Apriori-Information in unvollständige Bildraten im Zusammenhang mit der zerstörungsfreien Untersuchung.

del-Projektionsdaten über den gleichen Winkelbereich wie die gemessenen Daten, sowie eines vollständigen Bildes des Modells von den vollständigen Modell-Projektionsdaten und

Subtrahieren des vollständigen und des Teilbildes des Modells zur Schaffung eines Differenzbildes des Modells, das einen Rekonstruktionsfehler begrenzten Winkel repräsentiert und

Kombinieren des von den gemessenen Daten rekonstruierten Teilbildes und des Modell-Differenzbildes zur Schaffung eines endgültigen Bildes.

Das iterative Rekonstruktionsverfahren umfaßt das Abtasten des verfügbaren begrenzten Winkelbereiches mit Röntgenstrahlen und das Rekonstruieren eines Bildes von gemessenen Daten; das Berechnen der genauen Grenzinformation des Teiles von einem Modell des Teiles und der Röntgenschwächung aus bekannten physikalischen Parametern;

das Einstellen des Bildes mit dieser Apriori-Information, indem man Pixel außerhalb der Grenze des Teiles auf Null, negative Pixel auf Null und Pixel, die größer sind als ein vorausgewählter Schwächungswert, auf den Maximalwert setzt;

Errechnen der fehlenden Projektionsdaten aus den fehlenden Betrachtungswinkeln von dem modifizierten Bild; Rekonstruieren eines neuen Bildes aus den gemessenen Projektionsdaten und errechneten fehlenden Projektionsdaten und

Wiederholen, wie erforderlich, bis eine genügende Bildqualität erhalten wird.

Im folgenden wird die Erfindung unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Im einzelnen zeigt Fig. 1 einen Gegenstand mit Vorsprüngen, die es unmöglich machen, ein Abtasten über den gesamten Winkelbereich auszuführen;

Fig. 2 ein Blockdiagramm einer allgemeinen Technik zum Einbringen wichtiger und genauerer Apriori-Information über einen Gegenstand in das Verfahren zur Bildformation;

Fig. 3a und 3b charakteristische Merkmale von Bildern eines vertikalisierten Querschnittes durch einen Teil eines Triebwerkes, die mit vollständigen und unvollständigen Daten rekonstruiert wurden;

Fig. 4 eine Röntgen-Computertomographie-Untersuchung des Teiles und der gemessenen Projektionen, abgeleitet von einem Datensatz bei begrenztem Winkel und fehlenden Projektionen, errechnet aus Apriori-Information gemäß der Erfindung;

Fig. 5 ein Blockdiagramm des Herangehens mit Projektionsdaten zur Nutzung von Apriori-Information und zur Verbesserung der Qualität von NDE-Bildern;

Fig. 6 die Stufen zum Berechnen fehlender Projektionsdaten, die im Vorgeannten erforderlich sind;

Fig. 7 ein Blockdiagramm des Lösungsweges mit iterativ bzw. wiederholender Rekonstruktion;

Fig. 8 die Stufen beim Errechnen und Benutzen von Apriori-Information gemäß der iterativen Rekonstruktionstechnik und

Fig. 9 ein Blockdiagramm der Bildanalyse und des Verarbeitungs-Lösungsweges zum Rekonstruieren von Computertomographie-Bildern.

schonbild zu ergeben. Die erforderliche Apriori-Information wird aus zwei Quellen erhalten, den Blöcken 17 und 18, der Kenntnis der Geometrie des Teiles von Modellen des Teiles oder von Sensoren und den physikalischen Parametern des Teiles und, wenn möglich, der Abbildungsmittelqualitte, abgeleitet von der Kenntnis der Physik des Untersuchungsverfahrens. Das Zwischenbild mag eine ausreichende Qualität für den beabsichtigten Zweck haben oder nicht. Das Zwischenbild könnte Raum enthalten oder Artefakte aufgrund von unvollständigen Daten, z.B. Die Apriori-Information, die Blöcke 19 bis 21, wird durch einen Bildverarbeitungs-Algorithmus benutzt, um die Qualität des Endbildes zu verbessern. Die Materialeigenschaften des Bildes und die Eigenschaften seiner Fehler werden vom Endbild bestimmt. So kann z.B. ein Stahlgegenstand untersucht werden, um festzustellen, ob er Rostflecke oder Hohlräume im Metall aufweist. Es werden Annahmen und Zurückweisungsentscheidungen gemacht auf der Grundlage dessen, was im endgültigen Bild gefunden wird, entweder von einer Bedienungsperson oder einem Algorithmus. Dann kann die Apriori-Information sowohl bei der Bildformation als auch bei der Bildverarbeitung benutzt werden oder nur bei einem von beiden.

Ein typisches großes interessierendes Teil für die Röntgen-Computertomographie-Untersuchung ist ein Betätigungsring für eine Auslaßdose eines Flugzeugtriebwerkes. Ein komplexer Vertikal-Querschnitt durch den Betätigungsring ist bei 22 in Fig. 3a gezeigt, und dieser Schnitt geht durch eine der Naben bzw. einen dieser Vorsprünge, die sich an fünf Stellen in dem Teil über die obere Wand hinaus erstrecken. Dieses Teil hat eine Struktur mit mehreren Wänden, die mit üblichen NDE-Techniken schwer zu untersuchen ist. Die optimale Untersuchungskonfiguration besteht darin, Computertomographie-Schnitte bzw. -Schnitte durch jeden Wandteil des Teiles zu schaffen, so daß der Computertomographie-Schnitt parallel zur Symmetrieachse des Teiles liegt. Ein rekonstruiertes Computertomographie-Bild mit vollständigen Daten würde aussehen wie in Fig. 3a.

Für parallele Strahlendaten ergibt eine Abtastung über 180° vollständige Daten. Ein Bild des gleichen Abschnittes, der charakteristische Merkmale eines Computertomographie-Bildes, aber mit unvollständigen Daten, zeigt, ist bei 23 in Fig. 3b wiedergegeben. Die fehlenden Daten liegen in einem 40°-Kegel, von dem 180° parallel zur Längsachse des Teiles 22, wie es in Fig. 4 gezeigt ist. Der Querschnitt des Teiles ist betrchtlich höher als breit und aufgrund des relativ großen Aspekts bzw. Längenverhältnisses des Schnittes ist das Eindringen der Röntgenstrahlen in der Längsrichtung ein Problem. Besonders bemerkenswert ist das Fehlen von Information über Wnde, die parallel zu den fehlenden Datenrichtungen verlaufen, und es wurde festgestellt, daß im gesamten Bild Artefakte vorhanden sind. Es ist klar, daß die Qualität des Teiles außerordentlich schwer zu beurteilen ist auf der Grundlage solcher Bilder aus begrenztem Winkel. Die Verfahren der Erfindung zum Einbeziehen merklicher Mengen genauerer Apriori-Information in das Bild mit unvollständigen NDE-Daten ergibt ein Bild hoher Qualität vergleichbar einem Bild mit vollständigen Daten.

Ein elektronisches CAD-Modell, ein festes Modell des Teiles, das abgeteilt ist von einem dreidimensionalen festen Modellierer, ist eine ausgezeichnete Quelle für Information über die Geometrie des Teiles. Es wird Gebrauch gemacht von praktisch der gesamten Information, die in der Bause eines ausgewählten Industrieschenbild zu ergeben. Die erforderliche Apriori-Information wird aus zwei Quellen erhalten, den Blöcken 17 und 18, der Kenntnis der Geometrie des Teiles von Modellen des Teiles oder von Sensoren und den physikalischen Parametern des Teiles und, wenn möglich, der Abbildungsmittelqualitte, abgeleitet von der Kenntnis der Physik des Untersuchungsverfahrens. Das Zwischenbild mag eine ausreichende Qualität für den beabsichtigten Zweck haben oder nicht. Das Zwischenbild könnte Raum enthalten oder Artefakte aufgrund von unvollständigen Daten, z.B. Die Apriori-Information, die Blöcke 19 bis 21, wird durch einen Bildverarbeitungs-Algorithmus benutzt, um die Qualität des Endbildes zu verbessern. Die Materialeigenschaften des Bildes und die Eigenschaften seiner Fehler werden vom Endbild bestimmt. So kann z.B. ein Stahlgegenstand untersucht werden, um festzustellen, ob er Rostflecke oder Hohlräume im Metall aufweist. Es werden Annahmen und Zurückweisungsentscheidungen gemacht auf der Grundlage dessen, was im endgültigen Bild gefunden wird, entweder von einer Bedienungsperson oder einem Algorithmus. Dann kann die Apriori-Information sowohl bei der Bildformation als auch bei der Bildverarbeitung benutzt werden oder nur bei einem von beiden.

Ein typisches großes interessierendes Teil für die Röntgen-Computertomographie-Untersuchung ist ein Betätigungsring für eine Auslaßdose eines Flugzeugtriebwerkes. Ein komplexer Vertikal-Querschnitt durch den Betätigungsring ist bei 22 in Fig. 3a gezeigt, und dieser Schnitt geht durch eine der Naben bzw. einen dieser Vorsprünge, die sich an fünf Stellen in dem Teil über die obere Wand hinaus erstrecken. Dieses Teil hat eine Struktur mit mehreren Wänden, die mit üblichen NDE-Techniken schwer zu untersuchen ist. Die optimale Untersuchungskonfiguration besteht darin, Computertomographie-Schnitte bzw. -Schnitte durch jeden Wandteil des Teiles zu schaffen, so daß der Computertomographie-Schnitt parallel zur Symmetrieachse des Teiles liegt. Ein rekonstruiertes Computertomographie-Bild mit vollständigen Daten würde aussehen wie in Fig. 3a.

Für parallele Strahlendaten ergibt eine Abtastung über 180° vollständige Daten. Ein Bild des gleichen Abschnittes, der charakteristische Merkmale eines Computertomographie-Bildes, aber mit unvollständigen Daten, zeigt, ist bei 23 in Fig. 3b wiedergegeben. Die fehlenden Daten liegen in einem 40°-Kegel, von dem 180° parallel zur Längsachse des Teiles 22, wie es in Fig. 4 gezeigt ist. Der Querschnitt des Teiles ist betrchtlich höher als breit und aufgrund des relativ großen Aspekts bzw. Längenverhältnisses des Schnittes ist das Eindringen der Röntgenstrahlen in der Längsrichtung ein Problem. Besonders bemerkenswert ist das Fehlen von Information über Wnde, die parallel zu den fehlenden Datenrichtungen verlaufen, und es wurde festgestellt, daß im gesamten Bild Artefakte vorhanden sind. Es ist klar, daß die Qualität des Teiles außerordentlich schwer zu beurteilen ist auf der Grundlage solcher Bilder aus begrenztem Winkel. Die Verfahren der Erfindung zum Einbeziehen merklicher Mengen genauerer Apriori-Information in das Bild mit unvollständigen NDE-Daten ergibt ein Bild hoher Qualität vergleichbar einem Bild mit vollständigen Daten.

Ein elektronisches CAD-Modell, ein festes Modell des Teiles, das abgeteilt ist von einem dreidimensionalen festen Modellierer, ist eine ausgezeichnete Quelle für Information über die Geometrie des Teiles. Es wird Gebrauch gemacht von praktisch der gesamten Information, die in der Bause eines ausgewählten Industrieschenbild zu ergeben. Die erforderliche Apriori-Information wird aus zwei Quellen erhalten, den Blöcken 17 und 18, der Kenntnis der Geometrie des Teiles von Modellen des Teiles oder von Sensoren und den physikalischen Parametern des Teiles und, wenn möglich, der Abbildungsmittelqualitte, abgeleitet von der Kenntnis der Physik des Untersuchungsverfahrens. Das Zwischenbild mag eine ausreichende Qualität für den beabsichtigten Zweck haben oder nicht. Das Zwischenbild könnte Raum enthalten oder Artefakte aufgrund von unvollständigen Daten, z.B. Die Apriori-Information, die Blöcke 19 bis 21, wird durch einen Bildverarbeitungs-Algorithmus benutzt, um die Qualität des Endbildes zu verbessern. Die Materialeigenschaften des Bildes und die Eigenschaften seiner Fehler werden vom Endbild bestimmt. So kann z.B. ein Stahlgegenstand untersucht werden, um festzustellen, ob er Rostflecke oder Hohlräume im Metall aufweist. Es werden Annahmen und Zurückweisungsentscheidungen gemacht auf der Grundlage dessen, was im endgültigen Bild gefunden wird, entweder von einer Bedienungsperson oder einem Algorithmus. Dann kann die Apriori-Information sowohl bei der Bildformation als auch bei der Bildverarbeitung benutzt werden oder nur bei einem von beiden.

Ein elektronisches CAD-Modell, ein festes Modell des Teiles, das abgeteilt ist von einem dreidimensionalen festen Modellierer, ist eine ausgezeichnete Quelle für Information über die Geometrie des Teiles. Es wird Gebrauch gemacht von praktisch der gesamten Information, die in der Bause eines ausgewählten Industrieschenbild zu ergeben. Die erforderliche Apriori-Information wird aus zwei Quellen erhalten, den Blöcken 17 und 18, der Kenntnis der Geometrie des Teiles von Modellen des Teiles oder von Sensoren und den physikalischen Parametern des Teiles und, wenn möglich, der Abbildungsmittelqualitte, abgeleitet von der Kenntnis der Physik des Untersuchungsverfahrens. Das Zwischenbild mag eine ausreichende Qualität für den beabsichtigten Zweck haben oder nicht. Das Zwischenbild könnte Raum enthalten oder Artefakte aufgrund von unvollständigen Daten, z.B. Die Apriori-Information, die Blöcke 19 bis 21, wird durch einen Bildverarbeitungs-Algorithmus benutzt, um die Qualität des Endbildes zu verbessern. Die Materialeigenschaften des Bildes und die Eigenschaften seiner Fehler werden vom Endbild bestimmt. So kann z.B. ein Stahlgegenstand untersucht werden, um festzustellen, ob er Rostflecke oder Hohlräume im Metall aufweist. Es werden Annahmen und Zurückweisungsentscheidungen gemacht auf der Grundlage dessen, was im endgültigen Bild gefunden wird, entweder von einer Bedienungsperson oder einem Algorithmus. Dann kann die Apriori-Information sowohl bei der Bildformation als auch bei der Bildverarbeitung benutzt werden oder nur bei einem von beiden.

Ein elektronisches CAD-Modell, ein festes Modell des Teiles, das abgeteilt ist von einem dreidimensionalen festen Modellierer, ist eine ausgezeichnete Quelle für Information über die Geometrie des Teiles. Es wird Gebrauch gemacht von praktisch der gesamten Information, die in der Bause eines ausgewählten Industrieschenbild zu ergeben. Die erforderliche Apriori-Information wird aus zwei Quellen erhalten, den Blöcken 17 und 18, der Kenntnis der Geometrie des Teiles von Modellen des Teiles oder von Sensoren und den physikalischen Parametern des Teiles und, wenn möglich, der Abbildungsmittelqualitte, abgeleitet von der Kenntnis der Physik des Untersuchungsverfahrens. Das Zwischenbild mag eine ausreichende Qualität für den beabsichtigten Zweck haben oder nicht. Das Zwischenbild könnte Raum enthalten oder Artefakte aufgrund von unvollständigen Daten, z.B. Die Apriori-Information, die Blöcke 19 bis 21, wird durch einen Bildverarbeitungs-Algorithmus benutzt, um die Qualität des Endbildes zu verbessern. Die Materialeigenschaften des Bildes und die Eigenschaften seiner Fehler werden vom Endbild bestimmt. So kann z.B. ein Stahlgegenstand untersucht werden, um festzustellen, ob er Rostflecke oder Hohlräume im Metall aufweist. Es werden Annahmen und Zurückweisungsentscheidungen gemacht auf der Grundlage dessen, was im endgültigen Bild gefunden wird, entweder von einer Bedienungsperson oder einem Algorithmus. Dann kann die Apriori-Information sowohl bei der Bildformation als auch bei der Bildverarbeitung benutzt werden oder nur bei einem von beiden.

teilbar ist. Ein elektronisches Modell ist einfach eine mathematische Darstellung der Geometrie eines Teiles, die in einem Format gespeichert wird, das zum Computergebrauch praktikabel ist. Die spezifische mathematische Darstellung bestimmt die Genauigkeit des Modells des Gegenstandes: Einfache Drahtrahmenmodelle, die für diese Anwendung unannehmbar sind, können durch Punkte und diese verbindende Bögen geschaffen werden, während feste Modelle aus Oberflächen geschaffen werden können, die wiederum aus Kurven und Punkten geschaffen werden. Ein genaues festes Modell kann gedreht und geschnitten werden, um Informationen zu liefern über das Aussehen des Gegenstandes unter bestimmten Bedingungen, Information, die ohne Zerstören des Gegenstandes normalerweise nicht erhältlich ist. Das bevorzugte feste Modellsystem ist der feste Modellierer TRUCE von General Electric, beschrieben in "TRUCE - The Tridimensional Rational United Cubic Engine - Users Guide", R.T. Farouki und J.R. Hinds (1985), General Electric Co., Corporate Research and Development, Postfach 8, Schenectady, New York 12301. Es kann auch auf die US-PS 46 18 924 Bezug genommen werden. Andere Festmodelliersysteme können benutzt werden, doch sollten sie eine ausreichende Genauigkeit für das tatsächliche Herstellen haben. Das Festmodell liefert genaue Informationen über die inneren Teilgrenzen sowie die äußeren Grenzen.

Eine andere Quelle für A-priori-Information ist die Physik des Untersuchungsverfahrens. So bestimmen z.B. die Röntgenphysik und -geometrie der Untersuchung, wie das Röntgenabsorptionsvermögen des Teiles, das der abgebildete Parameter bei der Röntgen-Computer-tomographie ist.

Information über die Geometrie des Teiles kann man auch mit einem Berührungssensor und anderen zusätzlichen Sensoren anzeigen erhalten, die während der Untersuchung des Teiles anfallen. Ein solcher Sensor liefert Information über den Ort des Teiles sowie zusätzliche Information darüber, wie weit ein hergestelltes Teil vom elektronischen Modell differiert. Ist das Teil relativ einfach und kann es vollständig durch einen Berührungssensor abgetastet werden, dann mag dieser die einzige Quelle für die zusätzliche A-priori-Information über die äußere Begrenzung des Teiles sein.

Es sind verschiedene Techniken zum Einbeziehen von Modellinformation in Computer-tomographie-Bilder mit begrenztem Winkel entwickelt worden, um die Bildqualität zu verbessern. Es werden drei Lösungswege zum Einbeziehen von A-priori-Information diskutiert, der Lösungswege über die iterative Rekonstruktion und der Lösungswege über die Bildanalyse und -verarbeitung. Das Grundkonzept ist in Fig. 4 veranschaulicht, wo die gemessenen Projektionen 24 an verfügbaren Betrachtungswinkeln über den begrenzten Winkelbereich mit synthetisierten fehlenden Projektionen 25 aus dem Modell an fehlenden Betrachtungswinkeln über den nicht verfügbaren Winkelbereich kombiniert sind, um die Qualität des Computer-tomographie-Bildes zu verbessern.

Der Lösungswege mit den Projektionsdaten gemäß Fig. 5, Blöcke 26 bis 29, umfaßt das Erwerben gemessener Projektionsdaten über den verfügbaren Winkelbereich, das Errechnen von Projektionsdaten aus dem letzten Modell über den fehlenden Winkelbereich und die Rekonstruieren des Computer-tomographie-Bildes aus gemessenen Projektionsdaten im verfügbaren Winkelbereich und errechneten Projektionsdaten im fehlenden Winkelbereich. Die gemessenen und errechneten Projektionsdaten werden in Winkelbereich.

jektionsdaten zusammen liefern einen vollständigen Datensatz für die Computertomographie-Rekonstruktionssalgorithmen. Das fertige Bild des Teiles hat eine ausgezeichnete Bildqualität. Die Stufen beim Berechnen fehlender Projektionsdaten unter Verwendung der Geometrie des Teiles vom festen Modellierer und bekannten physikalischen Parametern des Teiles sowie der Röntgenquelle sind in Fig. 6, Blöcke 30 bis 34, gezeigt. Ein Schnitt durch das dreidimensionale feste Modell wird in ein zweidimensionales Pixelbild umgewandelt, und Pfadlängen, die von Röntgenstrahlen genommen werden würden, sind errechnet. Ist der Röntgendetektor eine Reihe, dann mag es eine große Zahl von zu erreichenden Pfadlängen geben, vom Brennpunkt der Quelle zu jedem Detektorelement. Die Pfadlängen im Teil im fehlenden Winkelbereich können errechnet werden unter Verwendung der Donner-Algorithmen für die Rekonstruktionsomographie, R.H. Huseman et al., Lawrence Berkeley Laboratory, Universität von Kalifornien (1977). Das Donner-Paket liefert auch die grundlegende Computertomographie-Rekonstruktionsfunktion. Die Röntgenschwächung des Teiles hängt von der Pfadlänge, dem Material des Teiles und der Röntgenenergie ab. Das Material ist auf der Blaupause angegeben, und wenn es eine Metallektierung ist, dann sind die Bestandteile der Legierung bekannt. Ein geeignetes Rechenverfahren besteht darin, die mittlere Energie der Röntgenröhre zu benutzen; Veröffentlichliche Tabellen enthalten einen Schwächungskoeffizienten für jedes Element der Legierung, und diese werden gemäß einer gegebenen Formel gemischt. Multiplizieren der Pfadlänge mit dem Koeffizienten ergibt die Projektionsdaten. Eine genaue Berechnung besteht darin, Tabellen zu benutzen, die auf alle Energien in der Röntgenröhre anwendbar sind, eingegeben wird die Pfadlänge und die Schwächung wird direkt errechnet.

Der Lösungsweg der iterativen Rekonstruktion, dargestellt in den Fig. 7 und 8, beruht auf einem Verfahren, das in dem oben genannten Artikel von Tam und Perez-Medez veröffentlicht ist, aber eine deutlich verbesserte Apriori-Information benutzt. Eine Röntgenabbildung des Teiles wird über den verfügbaren-begrenzten Winkelbereich ausgeführt und gemessene Projektionsdaten werden gesammelt. Gemäß den Blöcken 35 bis 37 in Fig. 7 wird ein reales Teilbild eines Teiles von den verfügbaren Projektionsdaten rekonstruiert, wobei man die gefilterte Rückprojektion oder einen anderen Algorithmus benutzt. Bei diesem Lösungsweg wird das rekonstruierte Bild zwischen dem Gegenstandsraum durch gefilterte Rückprojektion und dem Projektionsraum durch Projektion hin und her transformiert und dabei wiederholt durch eine Apriori-Information über den Gegenstand im Gegenstandsraum und die bekannten Projektionen im Projektionsraum korrigiert. Drei Arten von Apriori-Information, die Blöcke 38 und 42 bis 44 werden auf das Bild mit begrenztem Winkel angewendet. Ein Modell des Teiles wird geschaffen und Information über die Grenzen des Teiles errechnet. Das elektronische Modell, das von einem Festmodellierersystem abgeleitet wird, liefert genaue Information über die Außengrenze, und wenn das Teil, wie das in Fig. 3a, teilweise hohl ist, ebenso genaue Information über die inneren Grenzen. Alternativ die dreidimensionale Außenhülle, vorausgesetzt ein Berührungssensor kann benützt werden, doch gibt dieser nur Information über die Außengrenze. Eine andere Alternative besteht darin, die konvexe Außenhülle des Teiles zu bestimmen, wie in der DE-OS 38 06 110 beschrieben. Dies ergibt jedoch nur

gen und der Schwächung und der Schätzung unter Verwendung von Daten für die Rekonstruktion. Die Rekonstruktion eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und errechneten Projektionsdaten, die zusammen einen vollständigen Datensatz für die Computertomographie-Rekonstruktionsalgorithmen ergeben.

10. Verfahren nach Anspruch 9, worin das Berechnen der Pfadlängen durch das elektronische Modell eine Zwischenschstufe des Umwandels der Geometrie des Teiles von dem Festmodellgeber in ein zweidimensionales Pixelbild umfaßt, von dem aus die Pfadlängen errechnet werden.

11. Verfahren zum Abbilden beim zerstörungsfreien Untersuchen unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend

Abtasten eines Teiles mit Röntgenstrahlen über einen begrenzten Winkelbereich und Erzeugen gemessener Projektionsdaten bei verfügbaren Betrachtungswinkeln;

Rekonstruieren eines Teilbildes des Teiles aus den gemessenen Projektionsdaten;

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles, das abgeleitet ist aus einem dreidimensionalen Festmodellgeber und Berechnen der Pfadlängen durch das Modell sowohl bei den verfügbaren als auch den fehlenden Betrachtungswinkeln, der Schwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und der Röntgenquelle und dem Rekonstruieren eines Modell-Teilbildes aus den vollständigen Modell- und Teilbildes, zur Schaffung eines Modell-Differenzbildes, das einen Rekonstruktionsfehler bei begrenztem Winkel darstellt und

Kombinieren des Teilbildes, das aus den gemessenen Daten rekonstruiert ist und des Modell-Differenzbildes, um ein endgültiges Bild des Teiles zu erhalten.

12. Verfahren nach Anspruch 11, worin das Berechnen der Pfadlängen durch das elektronische Modell eine Zwischenschstufe des Umwandels der Geometrie des Teiles von einem Festmodellgeber in ein zweidimensionales Pixelbild umfaßt, von dem aus die Pfadlängen berechnet werden.

13. Verfahren zum Abbilden beim zerstörungsfreien Untersuchen unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen begrenzten Winkelbereich und Erzeugen gemessener Projektionsdaten an verfügbaren Betrachtungswinkeln;

Rekonstruieren eines Bildes des Teiles aus den gemessenen Projektionsdaten;

Schaffen eines Modells des Teiles und Berechnen von Information über die Begrenzung des Teiles; Berechnen der Schwächung des Abbildungsmittels durch das Teil unter Verwendung bekannter physikalischer Parameter des Teiles und der Abbildungsmittelquelle;

Einstellen des Bildes mit Apriori-Information, indem man Pixel außerhalb der Grenze des Teiles auf Null, negative Pixel auf Null und Pixel, die größer als ein vorausgewählter Maximal-Schwächungswinkelquelle;

Kombinieren der Geometrie des Teiles und der rechnerischen Abbildungsparameter-Daten über einen nicht zugänglichen Abtastbereich, der aufgrund einer Beschränkung nicht abgetastet werden kann und

Formen eines Bildes des genannten Teiles aus den gemessenen und errechneten Daten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Abbildungsmittel Röntgenstrahlen sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1, worin das Modell ein elektronisches Modell ist, das abgeleitet ist von einem festen Modellsystem.

4. Verfahren nach Anspruch 3, worin das Kombinieren und Bestimmen das Berechnen von Abbildungsmittel-Pfadlängen durch das Modell und das Berechnen der Schwächung des Abbildungsmittels aus den genannten physikalischen Eigenschaften umfaßt.

5. Verfahren zum Abbilden bei der zerstörungsfreien Untersuchung unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit einem Abbildungsmittel über einen begrenzten Winkelbereich und Erzeugen gemessener Projektionsdaten in verfügbaren Betrachtungswinkeln;

Berechnen der Schwächung des Abbildungsmittels durch das Teil aus bekannten physikalischen Parametern;

Bestimmen berechneter Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und der Schwächung und

Rekonstruieren eines Bildes des Teiles aus den gemessenen und berechneten Projektionsdaten.

6. Verfahren nach Anspruch 5, worin das Abbildungsmittel Röntgenstrahlen sind.

7. Verfahren nach Anspruch 6, worin die physikalischen Parameter die Materialien des Teiles und die Röntgenquellenenergie sind.

8. Verfahren nach Anspruch 5, worin das Berechnen der Pfadlängen durch das Modell eine Zwischenschstufe des Umwandels der Geometrie des Teiles aus dem elektronischen Modell in ein zweidimensionales Bild umfaßt, von dem die Pfadlängen ausgerechnet werden.

9. Verfahren zum Abbilden bei einem zerstörungsfreien Untersuchen unter Verwendung verbesserter Apriori-Information, umfassend:

Abtasten eines Teiles mit Röntgenstrahlen über einen begrenzten Winkelbereich und Erzeugen gemessener Projektionsdaten in verfügbaren Betrachtungswinkeln;

Schaffen eines elektronischen Modells des Teiles; das von einem dreidimensionalen Festmodellgeber abgeleitet ist und Berechnen der Röntgenstrahlen-Pfadlängen durch das elektronische Modell an den fehlenden Betrachtungswinkeln;

Berechnen der Schwächung aus bekannten physikalischen Parametern des Teiles und einer Röntgenquelle;

Bestimmen berechneter Projektionsdaten an den fehlenden Betrachtungswinkeln aus den Pfadlängen und der Röntgenquelle;

- wert sind, auf den Maximalwert setzt;
Berechnen der fehlenden Projektionsdaten von einem modifizierten Bild bei Winkeln außerhalb des begrenzten Winkelbereiches;
Rekonstruieren eines neuen Bildes aus den gemessenen Projektionsdaten und berechneten fehlenden Projektionsdaten und
iteratives Rekonstruieren einer Reihe fortschreitend verbesserter Bilder, bis eine genügende Qualität erhalten wird.
10 14. Verfahren nach Anspruch 13, worin das Abbildungsmittel Röntgenstrahlen sind;
15 15. Verfahren nach Anspruch 13, worin das Modell ein elektronisches Modell ist, abgeleitet von einem dreidimensionalen Festmodellgeber.

20
25
30
35
40
45
50
55
60
65

FIG. 1

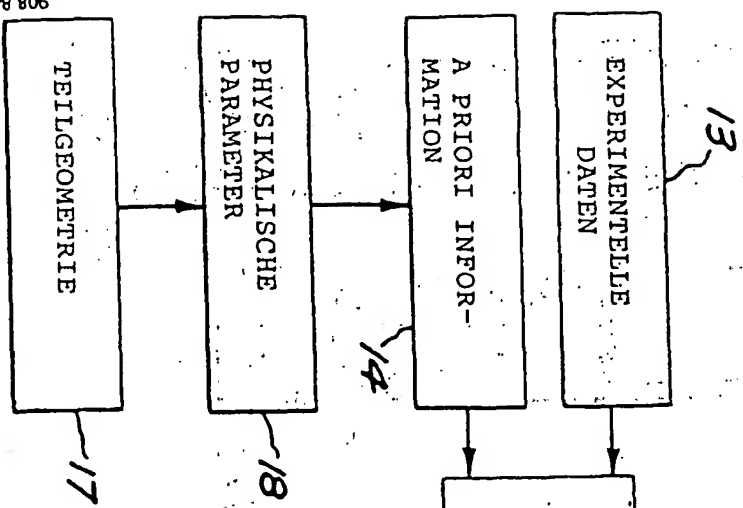
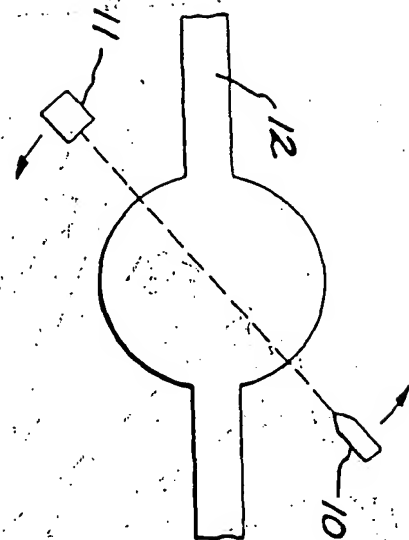
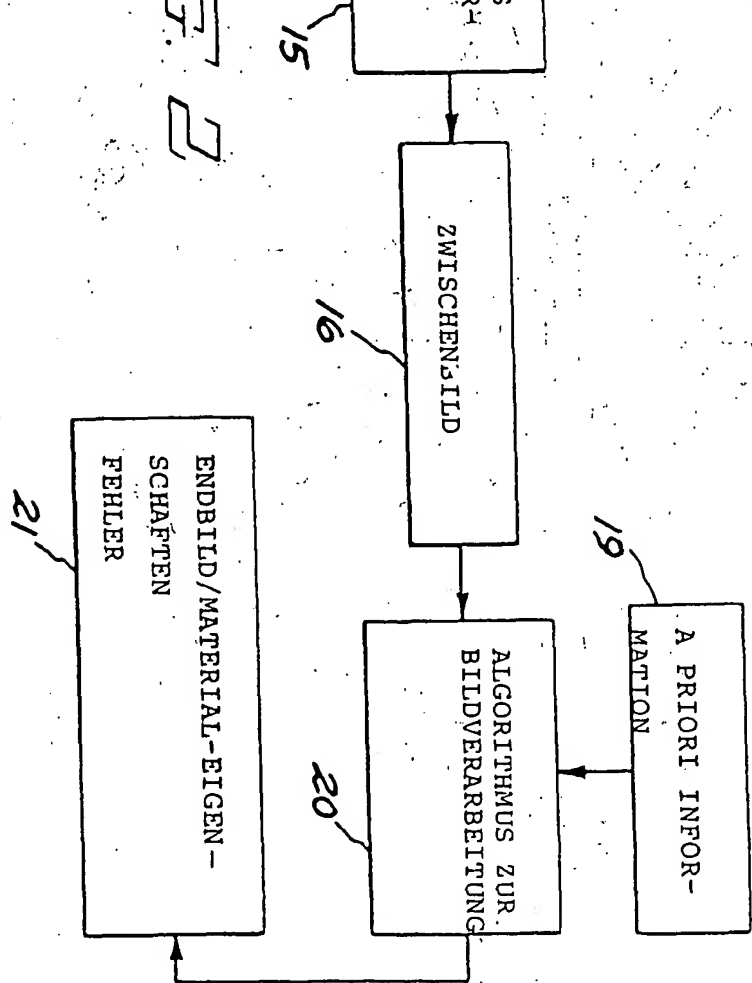


FIG. 2

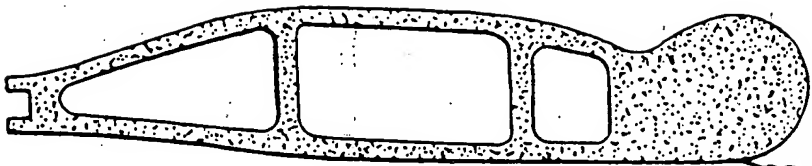


908 848/606

3915370

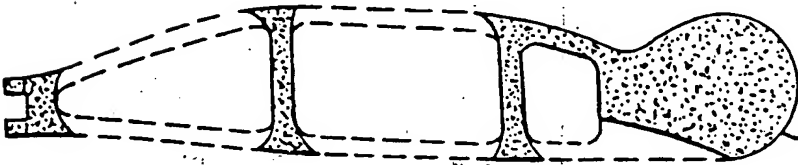
22

FIG. 3A



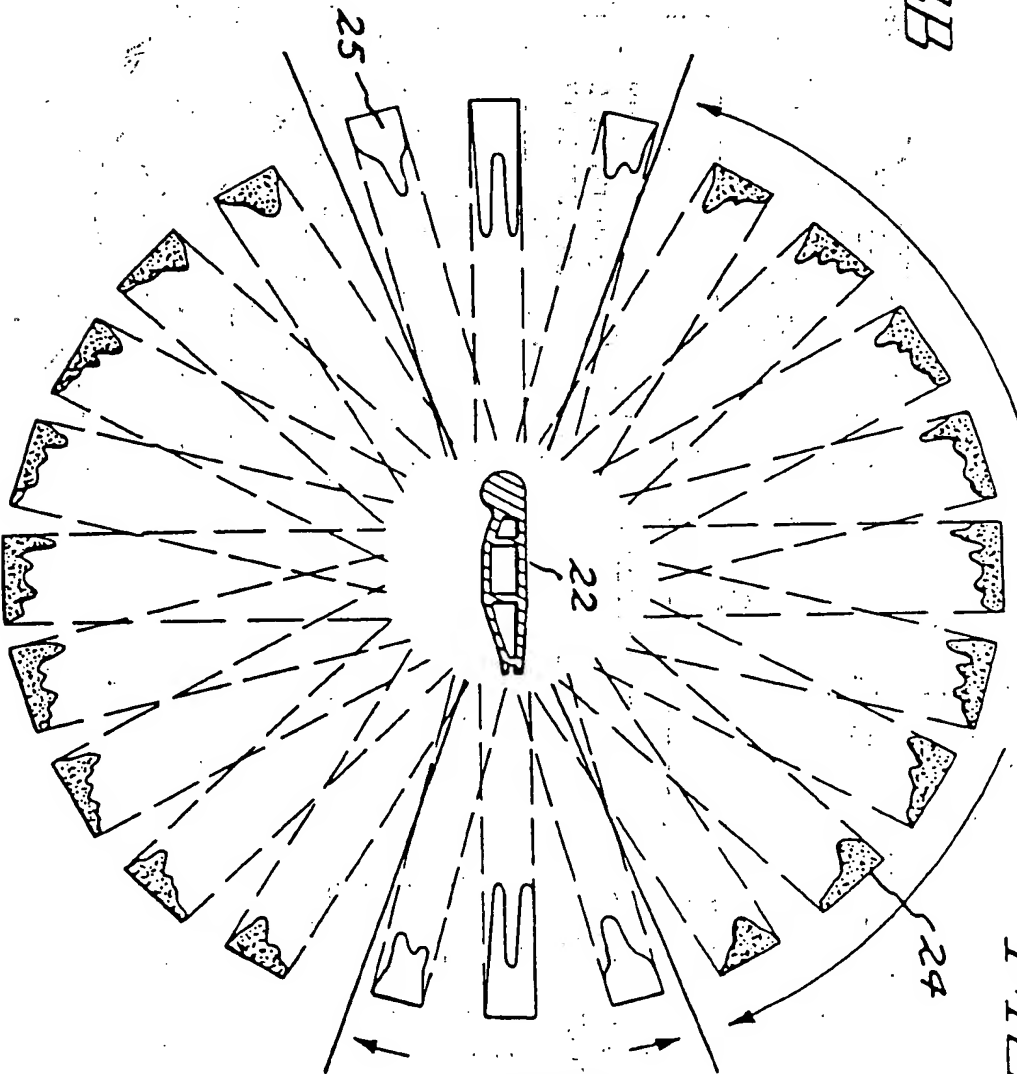
22

FIG. 3B



23

GEMESSENE PROJEKTIONEN
(140°)



24

FIG. 4

SYNTHETISIERTE
FEHLENDE
PROJEKTIONEN
VOM MODELL
(40°)

HERANGEHEN MITTELS PROJEKTIONS-DATEN

FIG. 5

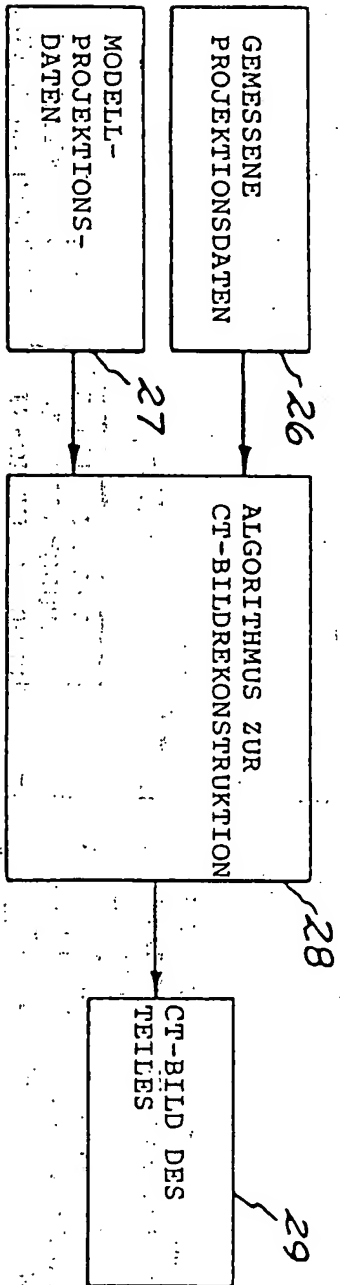
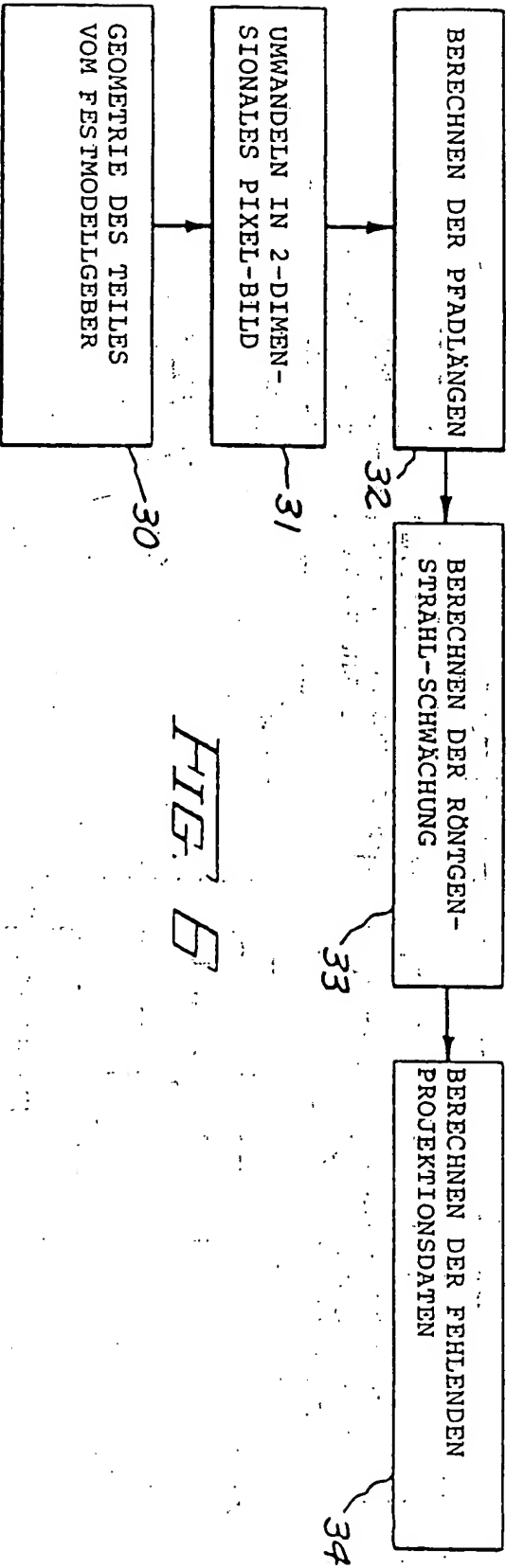


FIG. 6



HERANGEGEHEN DURCH ITERATIVE REKONSTRUKTION

FIG. 7

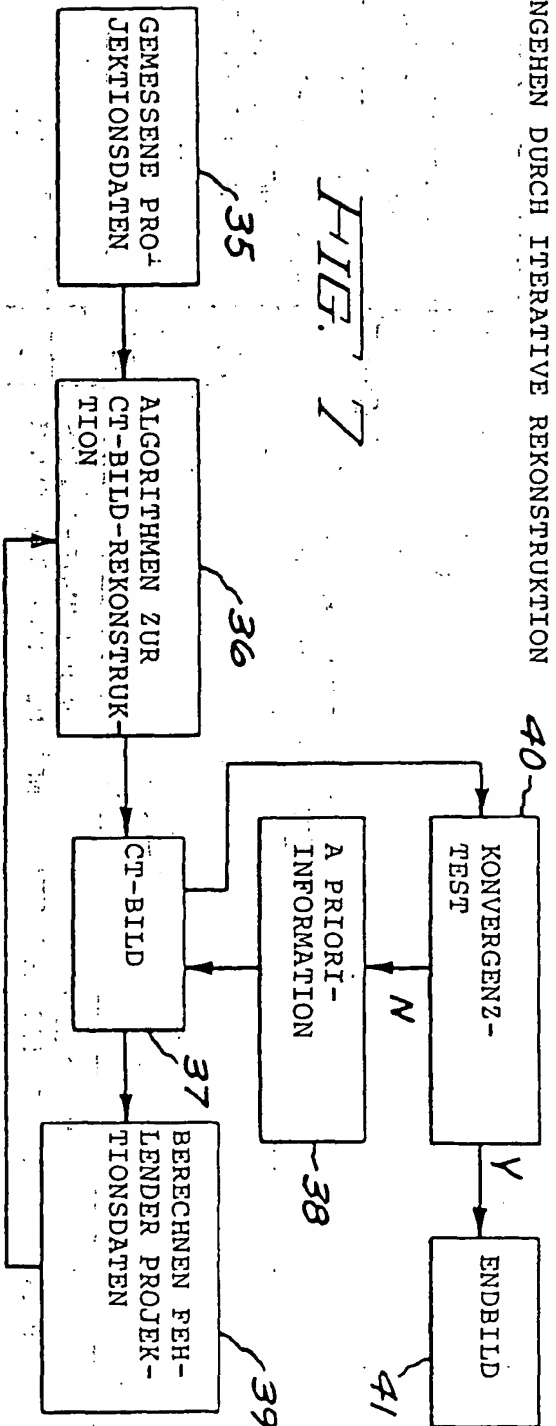
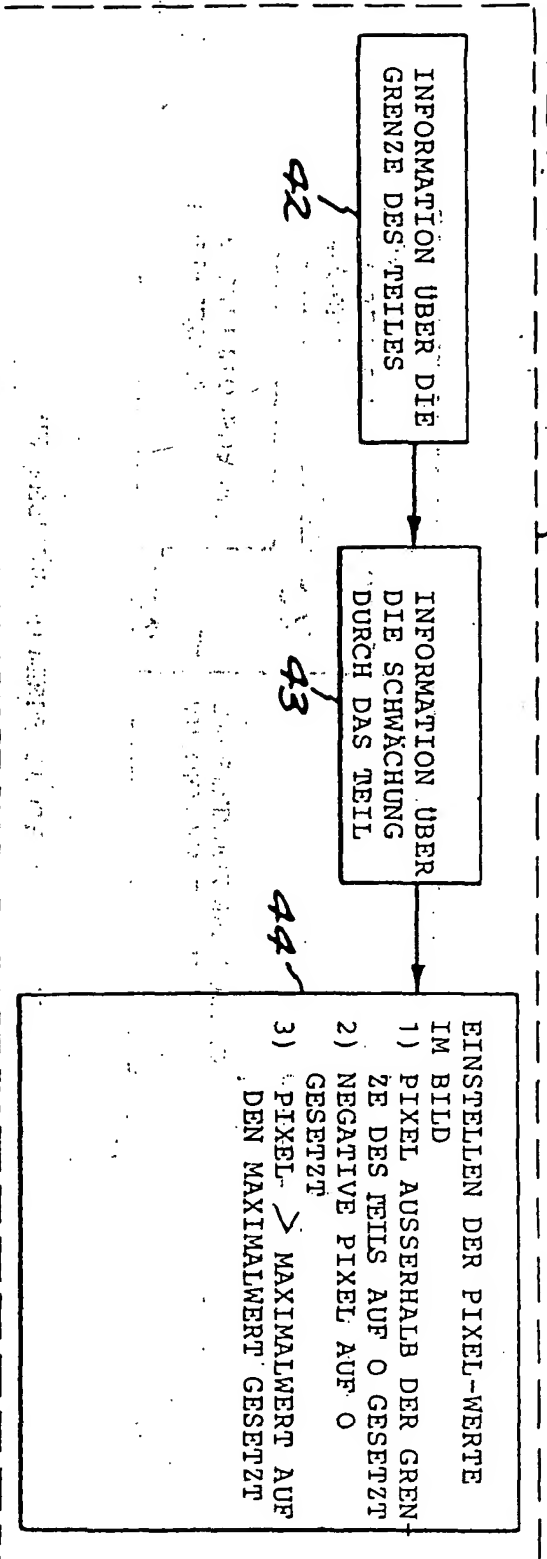


FIG. 8

38



HERANGEGEHEN ÜBER BILDERARBEITUNG UND -ANALYSE

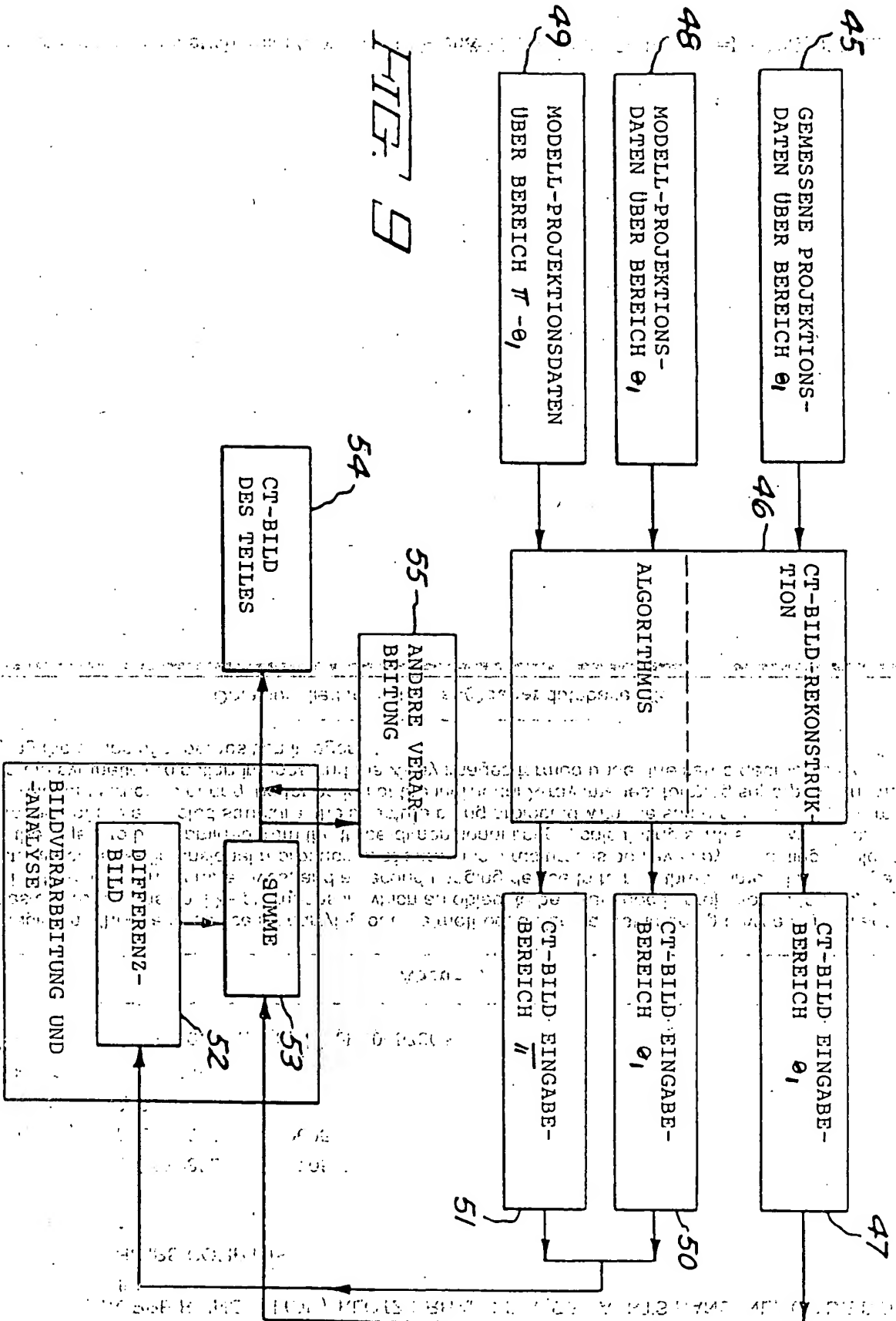


FIG. 9

*98

3915670

method

Image processing